



УДК 621.165

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ВЫХЛОПНОМ ПАТРУБКЕ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ Т-63/76-8,8**NUMERICAL SIMULATION OF FLOW IN A EXHAUST HOOD OF STEAM TURBINE Т-63/76-8,8**

Залужский Владимир Сергеевич, магистрант каф. «Турбины и двигатели», Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vladimirzaluzhsky@gmail.com, Тел.: +7(999)510-29-10

Плотников Петр Николаевич, доктор техн. наук, профессор каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: plot24@mail.ru. Тел.: +7(922)221-50-27

Vladimir S. Zaluzhskii, Master student, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vladimirzaluzhsky@gmail.com, Ph.: +7(999)510-29-10

Petr N. Plotnikov, Doctor of technical sciences, Professor, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: plot24@mail.ru. Ph.: +7(922)221-50-27

Аннотация: В работе рассматриваются основные этапы моделирования процесса течения рабочего тела в выхлопном патрубке паровой турбины Т-63/76-8,8. Выполняется анализ результатов расчёта, определяется коэффициент полных потерь, выявляются зоны неоптимального течения рабочего тела.

Abstract: The paper considers the main stages of modeling process of working fluid in the exhaust hood of a steam turbine Т-63/76-8.8. The analysis of calculation results is carried out, the coefficient of total losses is determined, the zones of non-optimal flow are identified.

Ключевые слова: паровая турбина; выхлопной патрубок; расчет; CFX.

Keywords: steam turbine; exhaust hood; calculation; CFX.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы совершенствования выхлопных патрубков (далее ВП) возрастает по мере того как происходит развитие и усовершенствование паровых турбин. На первых этапах, когда все элементы турбины были достаточно неоптимальными с точки зрения эффективности, выхлопным патрубкам не уделялось должного внимания и они проектировались на основании имеющихся в те времена знаний в области аэродинамики а также данных немногочисленных экспериментов, зачастую выполненных не в натуральную величину. Однако с того момента, когда все резервы по проточной части были исчерпаны, а также с развитием технологий компьютерного моделирования и методов вычислительной газодинамики, именно выхлопной патрубок стал главным резервом неиспользуемого потенциала рабочего тела. К примеру, для турбин серии Т-250/300-240 это 15 МВт мощности (энергия

потока покидающая выхлопной патрубок). Если частично использовать данную энергию, то возможно получить существенный эффект в повышении эффективности турбомшины [1]. Поэтому по мере совершенствования самих турбоагрегатов, ВП превращаются из второстепенного элемента в один из важнейших, поскольку патрубок также определяет работу как последней ступени, так и работу конденсатора. В эффективном ВП должно быть реализовано минимальное влияние патрубка на работу последних ступеней, а также выходное поле из патрубка было наиболее равномерным [1, 2].

Объект исследования – выхлопной патрубок теплофикационной паровой турбины Т-63/76-8,8. Данная турбина была разработана АО «УТЗ» для работы в составе ПГУ вместе с газовой турбиной ГТЭ-160-4(7) (LM3) или V94.2A (Siemens) для Ижевской ТЭЦ-1, Владимирской ТЭЦ-2, Новобогословской ТЭЦ и Кировской ТЭЦ-3 [6].

При создании данного ВП не проводились специальные исследования и не выполнялись расчеты патрубков. При их создании были использованы рекомендации и выводы, полученные в результате исследований ВП турбин серии Т-100-130 и Т-250/300-240 [3].

Характерной особенностью выхлопных патрубков АО «УТЗ» является их модульность, существует 4 основных типоразмера ВП – каждый под необходимую длину активной части рабочей лопатки (РЛ) последней ступени (550, 660, 830 и 940 мм).

В таблице 1 представлены машины, использующие вышеупомянутый ВП.

Таблица 1.
Унификация ВП для паровых турбин с РЛ последней ступени $l_{\text{раб}}=660$ мм.

Тип турбины	Кол-во	Год начала выпуска
Т-63/76-8,8	4	2012
ПТ-90/125-130/10-2	8	2001
Тп-115/125-130	7	1992

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью исследования является моделирование течения рабочего тела в ВП с целью изучения характера течения потока и последующего поиска путей его усовершенствования.

Критерием оценки аэродинамического совершенства патрубка, в рамках данной работы, послужит коэффициент полных потерь ξ_n . Коэффициент полных потерь является энергетической характеристикой, наиболее полно определяющей степень его совершенства. Данный коэффициент определяет суммарный уровень внутренних потерь и потерь с выходной скоростью и определяется по формуле:

$$\xi_n = \frac{1 - \left(\frac{P_2}{P_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(\frac{P_1}{P_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (1)$$

где P_2 – статическое давление на выходе из ВП; P_1 – статическое давление на входе в ВП; P_1^* – давление полного торможения на входе в ВП; k – показатель адиабаты [1].

Течение в ВП численно моделируется с помощью сертифицированного программного обеспечения ANSYS CFX.

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Расчетная область включает в себя проточную часть ВП. Для решения данной задачи в САПР CreoParametric 3.0 по чертежам завода изготовителя (рисунок 1), была построена

твердотельная модель парового пространства (рисунок 2), точно повторяющая все конструктивные особенности патрубка.

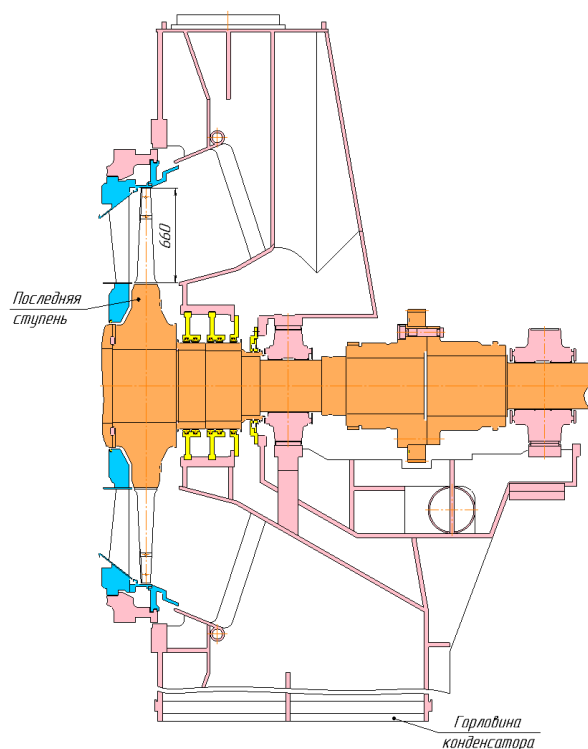


Рис. 1. Продольный разрез ВП Т-63/76-8,8

Твердотельная модель парового пространства представляет собой область, входом в которую является кромка последней ступени турбины, а выходом – горловина конденсатора.

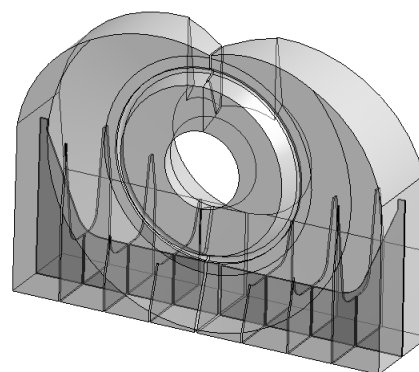


Рис. 2. Твердотельная модель парового пространства ВП Т-63/76-8,8

ВП имеет осерадиальный диффузор, нижняя половина «канального типа». Трехмерная модель выполняется с рядом допущений, главное из которых – отсутствие стяжек жесткости.

СОЗДАНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ВП

Для расчетов патрубков используются сетка конечных элементов, полученная при помощи инструмента ICEM-CFD (рисунок 3).

Сеточная модель, состоит из порядка 1,1 миллионов ячеек, имеющих форму тетраэдров на удалении от стенок и призм (5 слоев) вблизи стенок. Данный подход зарекомендовал себя [2,3,5] возможность одновременного наблюдения за широким спектром явлений в ВП: начиная от незначительных потерь на трение о стенки патрубков, заканчивая отслеживанием крупных вихрей и обратных токов.

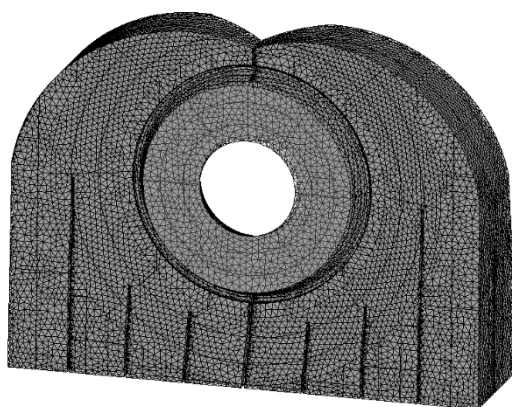


Рис. 3. Сетка конечных элементов

ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Данная задача рассматривалась на 4 конденсационных режимах при сочетании следующих граничных условий – температура и расход пара на входе в ВП и статическое давление на выходе (таблица 2).

Таблица 2.

Граничные условия расчета				
Режимы	100% G	75% G	50% G	25% G
Расход пара, т/ч	266	223,4	178,7	105,8
Температура на входе, °C	33,9	31,4	29,5	27,7
Статическое давление на выходе из ВП, кПа	0,054	0,047	0,042	0,038

Стоит отметить возможность альтернативной постановки данной задачи, с включением в рабочую область последней ступени (направляющие и рабочие лопатки). Результаты подобного расчета окажутся ближе к натурным в связи с более детальным учетом распределения параметров на выходе из последней ступени. Однако ввиду большой трудоёмкости и

необходимости значительных вычислительных мощностей, было принято решение о выполнении расчета в стационарной постановке.

Турбулентное стационарное течение вязкой среды моделируется осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса. Модель турбулентности $k - \epsilon$.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

По результатам моделирования течения рабочего тела в выхлопном патрубке Т-63/76-8,8 был произведен расчет ξ_p , результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Коэффициенты потерь и параметры потока

Режим	N_e , МВт	M	$P_{\text{стат.}}$ на входе в ВП, Па	ξ_p
100%G	75,5	0,44	5460	1,10
75%G	56,6	0,43	4750	1,11
50%G	37,8	0,31	4240	1,13
25%G	18,9	0,26	3785	1,19

На сегодняшний день, на исследуемом ВП не проводились натурные испытания, в связи с этим отсутствует возможность полноценной верификации расчетных данных.

Поэтому о качестве полученных данных можно судить только исходя из верификации самой методики расчета, выполненной в работе [3]. Также необходимо понимать, что расчетные коэффициенты полных потерь значительно ниже реальных ввиду отсутствия в расчетной области стенок жесткости, представляющих собой серьезное аэродинамическое сопротивление.

Однако даже из полученных минимальных значений ξ_p можно сделать вывод, что восстановления давления в ВП не происходит ($\xi_p > 1$). Также на рисунках 4,5 можно выделить наличие вихревых структур в потоке протяженностью от верхних границ ребер жесткости до горловины конденсатора.

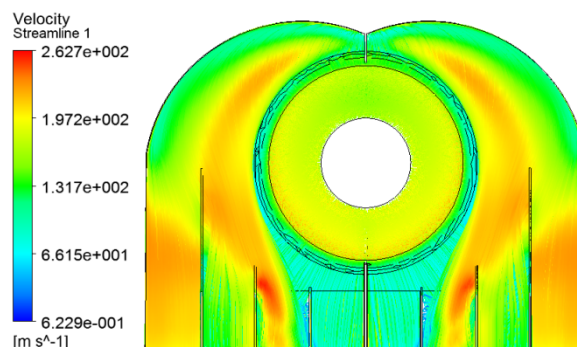


Рис. 4. Линии тока рабочего тела в ВП (сторона регулятора)

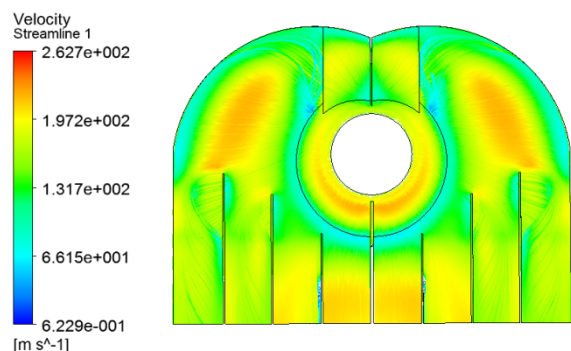


Рис. 5. Линии тока рабочего тела в ВП (сторона генератора)

Также анализ показал, что картина течения потока в выходном сечении патрубка (рис. 6) неблагоприятная: большая часть центрального канала «не работает», наблюдаются широкие зоны застойных течений.

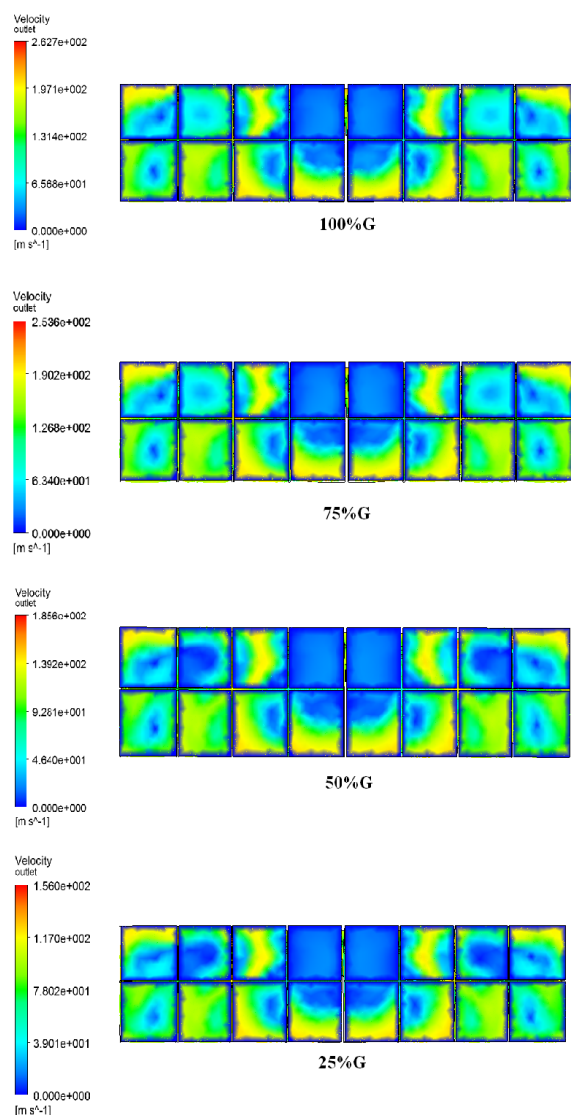


Рис. 6. Поля скоростей на выходе из ВП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов численного моделирования течения в ВП показал, что полученные значения коэффициентов полных потерь далеки от современных аналогов. К примеру, ВП турбины Т-125/120-12 АО «УТЗ» имеет $\xi_{\text{п}} = 0,77$ при работе на конденсационных режимах.

Исходя из полученных результатов расчетного исследования, следующей задачей является более глубокое изучение данного патрубка (расчет с учетом влажности пара, учет влияния последней ступени) с возможной последующей разработкой проекта модернизации.

Целесообразность проведения модернизации ВП подтверждается приростом мощности турбоагрегата и существенной экономией условного топлива (которое в свою очередь является показателем тепловой экономичности станции)[3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин – М.: «Энергия», 1970. – 384 с.
2. Зарянкин А.Е., Симонов Б.П. Выхлопные патрубки паровых и газовых турбин. - М.: Издательство МЭИ, 2002. - 274 с.
3. Ямалтдинов А.А. Разработка и исследование путей повышения эффективности выхлопных патрубков цилиндров низкого давления теплофикационных турбин: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12. – Екатеринбург: 2016 - 143 с.
4. Рис В.В. [и др.] Численное моделирование процессов течения в выхлопном патрубке паровой турбины: сопоставление результатов расчета с данными натурального эксперимента // Теплоэнергетика. - 2009. - №4. - С. 11-17.
5. Адамсон Д.А. [и др.] // Проектирование выходных патрубков мощных паровых турбин на основе вариантных расчетов трехмерного течения // Проблемы машиностроения. - 2012. - №12. - Вып. 3-4. С. 37-43.
6. Валамин А.Е. [и др.] // Теплофикационная паровая турбина Т-63/76-8,8 для серии ПГУ-230// Теплоэнергетика. - 2012. - №12. - С. 3-13.